

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ОЧЕРЕДИ ПАКЕТОВ

**Введение**

Доступная полоса пропускания, вероятность потери пакета, время доставки пакета и разброс времени доставки от отправителя к получателю – параметры качества обслуживания, которые зависят от алгоритмов формирования и обслуживания очередей пакетов в сетевых устройствах. Возникновение перегрузок при переполнении очередей сетевых устройств – одна из наиболее распространенных проблем, влияющая на обеспечение QoS. В рамках существующих сетевых технологий решение данного класса задач возложено на соответствующие механизмы управления очередями и распределения пропускной способности трактов передачи, протоколы маршрутизации, сигнализации и резервирования ресурсов.

До последнего времени единственным механизмом управления перегрузками и очередями в маршрутизаторах был алгоритм best-effort, который основывается на отбрасывании пакетов при переполнении буфера FIFO. Недостатком алгоритма FIFO является несправедливая обработка индивидуальных потоков, а также нарушение синхронизации потока. Для того чтобы устранить проблему глобальной синхронизации протокола TCP, вызванную применением алгоритма FIFO, были предложены алгоритмы активного управления очередью, принцип которых заключается в превентивном отбрасывании или маркировке пакетов в маршрутизаторе при достижении некой границы наполнения буфера.

В современных устройствах реализуются механизмы ограничения трафика Committed Access Rate (CAR), выравнивание трафика Traffic Shaping (TS) и Policing, алгоритмы обслуживания очередей Priority Queuing (PQ), Class-Based Queuing (CBQ), Weighted Fair Queuing (WFQ), механизм раннего обнаружения перегрузки RED, механизм явного уведомления о перегрузке (ECN), механизм избирательного отбрасывания пакетов (SPD) и другие [1,2].

**Анализ эффективности функционирования RED**

Рассмотрим достаточно эффективный алгоритм управления очередью маршрутизатора «случайное раннее обнаружение» перегрузки – Random Early Detection (RED), который еще до полного переполнения буфера отбрасывает пакеты. Также этот алгоритм работает на мультимедийном трафике с взрывной характеристикой, т.к. использует сглаживающую функцию с дополнительным применением вероятностной схемы. RED позволяет избегать эффекта глобальной синхронизации, свойственного протоколу TCP. Особенностью этого алгоритма является то, что решение о постановке пакета в очередь принимается в зависимости от уровня заполнения буфера (длины очереди).

Алгоритм RED базируется на двух основных параметрах: на среднем размере длины очереди и на вероятности отбрасывания пакета. Средний размер длины очереди  $\bar{x}$  вычисляется с помощью взвешенного сглаживающего фильтра согласно следующей формуле [1]:

$$\bar{x}(k) = \bar{x}(k-1) \cdot (1 - 2^{-n}) + (x \cdot 2^{-n}), \quad (1)$$

где  $n$  – экспоненциальный весовой фактор, конфигурируемый администратором,  $\bar{x}(k-1)$  – предшествующее значение средней длины очереди,  $x$  – текущее значение длины очереди. Алгоритм RED работает следующим образом. Пока средний размер длины очереди меньше некоторого минимального порога  $\bar{x}(k) < x_{\min}$ , пакеты не отбрасываются. При превышении минимального порога средним размером длины очереди  $\bar{x}(k) > x_{\min}$ , формируется команда о перегрузке и начинает работать механизм отбрасывания поступающих пакетов с некоторой вероятностью отбрасывания. Вероятностный механизм работает следующим образом. При малых значениях  $n$  скважность отбрасывания пакетов велика. С увеличением  $n$  эта скважность уменьшается, а вероятность отбрасывания пакета растет.



Рис. 1

Как показывает практика алгоритм RED оказывается эффективным при управлении адаптивными TCP-потоками. В то же время при совместном использовании потоков TCP и UDP приложений, алгоритм будет реагировать лишь на TCP-потоки и при большой нагрузке TCP-потоки будут отброшены.

Стандартный вид алгоритма RED ориентирован на то, что экспоненциальный весовой коэффициент выбирается администратором из субъективных соображений. Выбор параметра  $n$  осуществляется из субъективных соображений. При выборе большого значения  $n$  уменьшается вероятность сбоя сети, но при этом увеличивается число отбрасываемых пакетов. При малом значении  $n$  число отбрасываемых пакетов минимально, однако возрастает вероятность отказа сети.

Очевидно, невозможно выбрать такое значение  $n$ , которое одновременно удовлетворяло бы двум противоположным требованиям. Однако можно попытаться, связав  $n$  с одним из параметров механизма отбрасывания пакетов, получить оптимальное значение, изменяющееся во времени в зависимости от нагрузки и наличия свободного ресурса.

### Расчет средней длины очереди с помощью фильтра Робинса-Монро

Выражение (1) представляет собой рекурсивную процедуру оценки, которая после преобразования будет иметь вид:

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k-1) + 2^{-n} \cdot (x(k) - \hat{x}(k-1)). \quad (2)$$

Очевидно,  $x(k)$  представляет собой случайный процесс изменения длины очереди. Этот процесс коррелированный с поступающим трафиком и, как и трафик, является в общем случае нестационарным. Рекомендательный в различных технологиях параметр  $n$  при большом значении не может быть использован для быстроизменяющегося нестационарного процесса. Поэтому процедура оценки (2) не является оптимальной.

В данном случае необходимо использовать более общую процедуру, обладающую большей реактивностью. К числу таких может быть отнесена процедура Робинса-Монро или Калмана-Бьюси.

Значение  $x(k)$  подлежит контролю и измеряется соответствующими датчиками. При изменении этих величин происходят ошибки связанные с дискретизацией самого значения  $x(k)$ , так называемые шумы квантования, а также присутствует аддитивный гауссовский шум измерения переменных состояния (загруженности буфера очереди). Таким образом, имеется возможность контролировать длину очереди. При этом наблюдению подлежит следующий процесс:

$$z(k) = x(k) + \omega(k), \quad (3)$$

где  $\omega(k)$  – гауссовский шум измерения переменных состояния (загруженности буфера очереди).

Процесс  $x(k)$  необходимо статически обработать и получить оценку. В качестве такой оценки может быть среднее значение, определяемое как

$$\hat{x} = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^I x_i. \quad (4)$$

Вместе с тем, такую оценку на практике использовать достаточно сложно, поскольку для набора статистики размером  $I$  требуется время. Поэтому на момент оценки данные могут уже устареть. Более целесообразной является оценка условного среднего, получаемая как рекурсивная процедура:

$$x(k) = f \{x(k-1)\}. \quad (5)$$

В том случае, когда  $x(k)$  является случайной величиной  $\hat{x}(k)$  представляет собой процедуру стохастической аппроксимации. В качестве такой может быть использована процедура Робинса-Монро [4]:

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k-1) + K(k) [z(k) - \hat{x}(k-1)], \quad (6)$$

где  $K(k)$  удовлетворяет условиям Дворецкого, когда  $K(k) = \sum_{i=1}^k K_i^2 < \infty$ .

Практика показывает, что процедура достаточно устойчиво работает и при значении  $K(k) = const$ . Получаемая при этом оценка удовлетворяет критерию минимума среднего квадрата ошибки оценки, а  $K(k)$  обеспечивает скорость сходимости этой процедуры к установившемуся состоянию. При  $K(k) = 1$  скорость сходимости постоянна, однако апостериорная ошибка оценки достаточно велика. На практике выбирают значение  $K(k) = 0,6 \dots 0,8$ , при этом установившееся состояние наступает на интервале нескольких десятков шагов. Структурная схема дискретного фильтра Робинса-Монро, изображена на рис. 2.

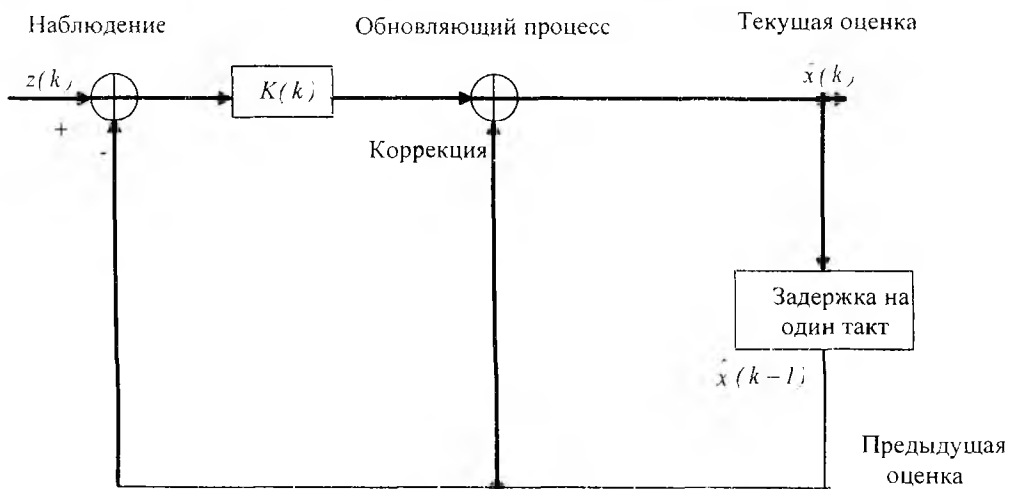


Рис. 2

Анализ структурной схемы рис. 2 показывает, что в фильтре Робинса-Монро реализуется идея предсказания – коррекции. Предыдущая оценка  $\hat{x}(k-1)$  экстраполируется на один шаг вперед и затем используется для получения наилучшей оценки нового наблюдения  $z(k)$ , основанной на предыдущих наблюдениях. Ошибка между «наилучшей оценкой» текущего наблюдения и фактическим наблюдением, а именно  $\Delta x(k) = x(k) - \hat{x}(k)$  представляют собой новую информацию, а процесс вычисления  $\Delta x(k)$  – носит название обновляющего. Далее полученная разница взвешивается с весом  $K(k)$ , учитывающим значение дисперсий входного процесса, измерения и ошибки оценивания для формирования сигнала коррекции. Сигнал коррекции складывается с предсказанной оценкой, и в результате получается новая оценка.

Таким образом, решение задачи оптимального управления сетевыми ресурсами (длинной очереди буфера) состоит в оценивании стохастического аналога функционала (1). Получаемая при этом оценка используется далее для вычисления  $n$ . И результаты моделирования показывают, что адаптивный выбор значения  $n$  позволяет минимизировать вероятность сбоя сети при допустимой величине потери пакетов.

### Экспериментальная оценка предложенной методики управления длиной очереди

Постоянная корректировка RED-параметров сетевым администратором требует от него достоверного определения значения экспоненциального весового коэффициента в соответствии с текущим значением средней длины очереди. Фильтр Робинса-Монро может использоваться для оценки длины очереди в буфере, а соответственно и экспоненциального весового коэффициента (1).

Несмотря на широкую популярность рекурсивных процедур Робинса-Монро, реализация ее на практике оказывается не столь тривиальной, поскольку внедрение в оборудование требует создания новых платформ, принятия протоколов, поддерживающих эту методику, и создания операционных систем.

С целью оценки эффективности алгоритма RED и эффективности использования предложенной методики управления длиной буфера был проведен эксперимент, схема исследований которого представлена на рис. 3.

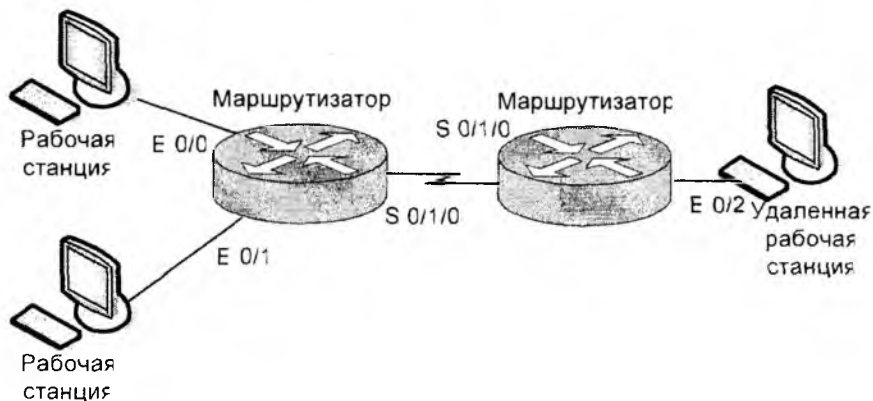


Рис. 3

Исследуемая схема состоит из двух маршрутизаторов Cisco Systems серии 2801 и рабочих станций. На маршрутизаторах реализована возможность включения алгоритма RED, изменение значений размера буфера маршрутизатора, скорости входящего, исходящего потоков трафика, максимальной и минимальной длины очереди пакетов, значение экспоненциального весового коэффициента  $n$ .

Для реализации предложенной методики оптимального управления на маршрутизаторе был создан следующий конфигурационный файл:

```
Router1(config)# class-map test
Router1(config-cmap)# match any
Router1(config)# policy-map test
Router1(config-pmap)# class test
Router1(config-pmap-c)# bandwidth 64000
Router1(config-pmap-c)# queue-limit 256
Router1(config-pmap-c)# random-detect exponential-weighting-constant 5
```

С помощью приведенных команд на одном маршрутизаторе была реализована политика отбрасывания пакетов при перегрузке сети при помощи механизма RED, задан весовой коэффициент. На втором маршрутизаторе реализован алгоритм FIFO, который является прозрачным для трафика и не влияет на работу механизма RED. Статистика потерянных пак-

тов, задержки, джиттера, изменения скорости передачи проводилась на удаленной рабочей станции.

Скрипт, созданный в среде bash, опрашивает маршрутизатор в реальном времени. Полученные значения текущей длины очереди используются фильтром Робинса-Монро (реализован в Matlab 6.5) для определения среднеквадратического значения длины очереди и вычисления согласно полученному результату экспоненциального весового коэффициента.

### **Выводы**

Таким образом, неадаптивное изменение параметров механизма RED может привести к увеличению вероятности отбрасывания пакетов. В работе предложена методика оптимального управления длиной очереди, согласно которой средняя длина очереди на сетевом устройстве оценивается с помощью фильтра Робинса-Монро. На основании полученных значений проводится расчет экспоненциального весового коэффициента  $n$ , который соответствует текущему значению средней длины очереди. К достоинствам предложенной методики можно отнести адаптивность механизма RED к различным условиям перегрузки сети, преодоление зависимости среднего размера длины очереди от загруженности канала.

**Список литературы:** 1. *Вегенша Ш.* Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. 386 с. 2. *Засецкий А.В., Иванов А.Б., Постников С.Д.* Контроль качества в телекоммуникационных сетях. М.: Syrus Systems. 2001. 3. *Athuraliya S., Lapsley D., Low S.* Random early marking for Internet congestion control. In Proceedings of IEEE GLOBECOM, 1999. 4. *Левин М.* Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 498 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 07.11.2007*